

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ НА ОСНОВЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF BAR ROLLING ON THE BASIS OF TEMPERATURE MODELS

М.А. Соседкова, Ф.С. Дубинский, Т.А. Лисовская

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, sosedkovama@susu.ac.ru

Abstract

Mathematical models describing the thermal processes occurring in the deformation focus and process stream of the mill are created. Problems of optimization of technological regimes to achieve desired conditions for process of bar rolling and eliminate uneven temperature distribution along the strip are solved. On mathematical models of stress-strain state and temperature fields in the deformation focus basis problem of forecasting defect formation rolling are solved.

На качество проката оказывают влияние различные технологические факторы и, в том числе, температурные режимы процесса.

Моделирование тепловых процессов, происходящих при прокатке сортовых профилей, служит базой для анализа и совершенствования существующих, и разработки новых технологий прокатки, которые обеспечивают получение продукта требуемого качества.

Созданы математические модели, определяющие температурные режимы нагрева, прокатки и охлаждения металла в технологическом потоке стана и температурные поля в очаге деформации.

На рисунке показана структурная схема совершенствования технологий прокатки сортовых профилей на основе реализации разработанных математических моделей.

Назначение и поддержание требуемых температурных условий технологического процесса производства сортовых профилей является важным фактором для обеспечения необходимых свойств продукции. Высокие требования к качеству проката могут быть выполнены только при условии поддержания температуры прокатки в заданных пределах, особенно это касается температуры конца прокатки.

Важно не только определять температурные условия в системе нагрев – деформация – охлаждение, но и назначать технологические режимы, а также располагать основное оборудование при проектировании нового стана, так, чтобы обеспечить требуемые температурные условия, а также оптимизировать энергетические затраты процесса.



Рисунок – Структурная схема совершенствования технологий прокатки сортовых профилей на основе температурных моделей

В общем виде целевая функция задачи оптимизации технологических режимов и размещения оборудования для обеспечения требуемой температуры полосы в любой точке технологического потока стана выглядит следующим образом:

$$|t^* - t(x_1, x_2, x_3, \dots)| \rightarrow \min$$

где t^* , t – заданная и расчетная температуры металла; x_1, x_2, x_3, \dots – варьируемые параметры.

Для расчета температуры металла используется модель, разработанная на кафедре ОМД ЮУрГУ. Модель учитывает изменения температуры непосредственно в прокатных клетях и межклетевых промежутках, в подогревающих или охлаждающих устройствах, при транспортировке металла в линии стана, применима для расчета температуры различных прокатываемых материалов при анализе и разработке технологии для любого типа сортового стана.

Общий вид модели для определения температуры металла в технологическом потоке прокатного стана имеет вид

$$t_i = t_{i-1} - \sum_{j=1}^{n_1} \Delta t_{ij} + \sum_{k=1}^{n_2} \Delta t_{ik} + \sum_{l=1}^{n_3} \Delta t_{il} - \sum_{z=1}^{n_4} \Delta t_{iz}$$

где t_{i-1} – температура металла в точке предыдущего расчета или заданная температура; Δt_{ij} – потери температуры металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана; Δt_{ik} – разогрев металла в процессе деформации; Δt_{il} – повышение температуры за счет подогрева в подогревающих устройствах; Δt_{iz} – охлаждение проката в охлаждающих устройствах; $i = \overline{1, n}$ – факторы, влияющие на изменение температуры металла; $j = \overline{1, n_1}$ – факторы, способствующие охлаждению металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана; $k = \overline{1, n_2}$ – факторы, вызывающие разогрев в процессе пластической деформации; $l = \overline{1, n_3}$ – подогревающие устройства в линии прокатного стана; $z = \overline{1, n_4}$ – охлаждающие установки в линии прокатного стана.

Анализ составляющих теплового баланса, реализованного в модели, позволил определить параметры управления температурными режимами

процесса. В качестве управляющих в зависимости от условий процесса, особенностей технологии и оборудования, типа прокатного стана и поставленных задач могут быть предложены следующие параметры: начальная температура нагрева заготовок в печи, скорость прокатки и показатели деформации в проходах, длина и площадь поперечного сечения заготовки, расстояния между клетями, количество проходов, время пауз и т.п.

Одной из проблем, возникающей при сортовой прокатке, является неравномерность распределения температуры по длине полосы. Это приводит к отклонениям размеров профиля и снижению точности и качества проката. Математическая модель позволяет определять не только среднемассовую температуру, но и при необходимости температуру в определенном сечении по длине полосы. На ее основе решена задача оптимизации технологических параметров для устранения этой неравномерности.

Проведено исследование влияния режимов нагрева и деформации на расход энергоносителей, затрачиваемых в технологическом процессе. Сделаны выводы, позволяющие назначить режимы нагрева и прокатки таким образом, чтобы обеспечить снижение расхода энергоносителей.

В общем виде данную задачу можно представить следующим образом:

$$\tilde{N}_\Sigma = \tilde{N}_A + \tilde{N}_O \rightarrow \min$$

где \tilde{N}_Σ – суммарная стоимость энергоносителей; \tilde{N}_A – стоимость электроэнергии, затрачиваемой на прокатку единицы массы металла; \tilde{N}_O – стоимость энергоносителей, затрачиваемых на нагрев единицы массы металла.

Для изучения тепловых процессов происходящих непосредственно при пластической деформации металла в клети создана математическая модель, описывающая температурное поле в очаге деформации при прокатке сортовых профилей. Задача решена методом конечных элементов на основе дифференциального уравнения теплопроводности.

Для аппроксимации функции, описывающей распределение температуры внутри отдельного конечного элемента с номером (e) выбрана зависимость

$$T^{(e)} = a_0^{(e)} + a_1^{(e)}z + a_2^{(e)}x^2 + a_3^{(e)}y^2 + a_4^{(e)}z^2.$$

Для определения узловых значений температуры применялся метод Галеркина. С учетом граничных условий получено уравнение

$$\sum_{e=1}^8 \int_{V^{(e)}} N_{\alpha}^{(e)} \left\{ c\rho \left[\frac{\partial \hat{T}^{(e)}}{\partial t} + (\vec{v}, \overrightarrow{\text{grad}} \hat{T}^{(e)}) \right] - \tau_s H \right\} dV -$$

$$- \sum_{s=4}^6 \int_{S^{(s)}} C_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] N_{\alpha}^{(e)} dS - \int_{S^{(7)}} N_{\alpha}^{(e)} \alpha_s (\hat{T}^{(e)} - T_b) dS = 0$$

где $V^{(e)}$ – объем конечного элемента с номером (e) ; $N_{\alpha}^{(e)}$ – функции формы элементов; \vec{v} – вектор скорости материальных частиц; τ_s – сопротивление металла пластической деформации сдвига; H – интенсивность скоростей деформаций сдвига; $S^{(s)}$ – площадь поверхности конечного элемента; C_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; ε – степень черноты излучающей поверхности; C – удельная теплоемкость металла; ρ – массовая плотность металла; T_c – температура окружающей среды;

α_s – коэффициент теплопередачи на контактной поверхности; T_b – температура валков.

В результате реализации метода получаем значения температуры в узлах конечно-элементной сетки T_{β} , которые являются решением системы линейных уравнений

$$k_{\alpha\beta} T_{\beta} = B_{\alpha},$$

где α, β – глобальный номер узла.

При этом коэффициенты системы линейных уравнений и компоненты вектора свободных членов вычисляются по формулам

$$k_{\alpha\beta} = \sum_{e=1}^8 \int_{V^{(e)}} \left[c\rho N_{\alpha}^{(e)} \left(v_x \frac{\partial N_{\beta}^{(e)}}{\partial x} + v_y \frac{\partial N_{\beta}^{(e)}}{\partial y} + v_z \frac{\partial N_{\beta}^{(e)}}{\partial z} \right) + \lambda \left(\frac{\partial N_{\alpha}^{(e)}}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_{\beta}^{(e)}}{\partial x} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{\partial N_{\alpha}^{(e)}}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_{\beta}^{(e)}}{\partial y} + \frac{\partial N_{\alpha}^{(e)}}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_{\beta}^{(e)}}{\partial z} \right) \right] dV - \alpha_s \int_{S_7} N_{\alpha}^{(2)} N_{\beta}^{(2)} dS$$

$$B_{\alpha} = \sum_{e=1}^8 \int_{V^{(e)}} \tau_s H N_{\alpha}^{(e)} dV + \sum_{s=4}^6 \int_{S^{(s)}} C_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] N_{\alpha}^{(e)} dS - \alpha_s T_b \int_{S_7} N_{\alpha}^{(2)} dS$$

где $N_{\alpha}^{(e)}, N_{\beta}^{(e)}$ – функции формы элементов;

v_x, v_y, v_z – компоненты вектора скорости материальных частиц; λ – коэффициент теплопроводности;

Математическая модель температурного поля в совокупности с моделью напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, позволяют, используя известную теорию разрушения металлов Колмогорова, определять степень истощения ресурса пластичности и проводить анализ возможности образования дефектов проката для существующих и предлагаемых технологических решений.

С использованием математических моделей тепловых процессов, входящих в вычислительный комплекс «Технология сортовой прокатки», разработанный на кафедре ОМД ЮУрГУ, выполнен ряд работ по совершенствованию технологических процессов и реконструкции станков на ряде предприятий страны: ОАО «ЧМК» г. Челябинск, АО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» г. Верхняя Салда, ОАО «Камасталь» г. Пермь и др.